

洋上ウィンドファーム建設に向けた 発電・流通変電システム

Power Generation, Distribution and Substation System for Development of Offshore Wind Farms

井上 信三
Inoue Shinzo

石橋 達司
Ishibashi Tatsuji

松信 隆
Matsunobu Takashi

世界各国で再生可能エネルギーの導入が進められており、中でも電力量当たりの発電コストが比較的低い風力発電は、再生可能エネルギーの大きな柱として期待されている。これまで国内における風力発電は主に陸上で行われてきたが、洋上は陸上と比較して風速が高く安定していることから、開発の拡大が予想されている。

日立製作所は、洋上ウィンドファーム建設に向けて5 MWダウンウィンド大型風力発電システムを開発し、送変電システムと併せて発電から電力供給までのトータルソリューションを提供する。

1. はじめに

近年、地球環境の保護と、国産エネルギー源確保の観点から、日本国内における再生可能エネルギーに対する期待は高まっている。風力発電についても2012年7月に再生可能エネルギーの固定価格買取制度が開始したことを受け、各地で着実に開発が進められている。

現在、国内で運転中の風力発電設備の多くは陸上に設置されているが、洋上は一般に陸上よりも風速が高く、騒音や景観に関する評価も容易になるなどの利点もあり、期待は大きい。環境省の「平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査」¹⁾によると、国内の洋上風力の導入ポテンシャルは約15.7億kWで、2009年度の国内10電力会社の設備容量2億397万kW²⁾の約8倍と算出されている。

一般的に洋上ウィンドファームの建設は、陸上と比較してより大きな投資を必要とするが、これは陸上に比べ基礎構造が大規模で複雑なことや、洋上での据付け工事、海底ケーブルを含む送電システムによるところが大きい。そのため、洋上ウィンドファームの収益性を高めるためには、設置する風車の基数を減らす代わりに1基当たりの出力を高めることが有効とされ、陸上用の大型機である2 MW～3 MWクラスの風車よりも大型の風力発電設備が求められている。

ここでは、洋上ウィンドファームへの適用を想定したダウンウィンド型の5 MW大型風力発電設備の概要と、ウィンドファームの電力流通変電設備について述べる。

2. 5 MW大型洋上風力発電システム

2.1 ダウンウィンド型風力発電システムの特徴

現在開発中の定格出力5 MWの大型風力発電システム「HTW5.0-126」の概略寸法を図1に、パワーカーブの設計値を図2に、主要諸元を表1にそれぞれ示す。

この風力発電システムは、現在運用されている2 MWの「HTW2.0-80」と同様にダウンウィンド型のレイアウトを採用している。大型風車においてはロータをタワーの風上側に配置するアップウィンド型が一般的である。しかし、例えば系統事故による停電と急激な風向の変化が組み合わさるようなケースにおいて、ダウンウィンド型の風車は直ちにナセルが風を自動的に受け流せる方向に向くフリーヨーに移行できるため、風車に生じる転倒モーメントを低減することが可能である。これにより、ウィンド

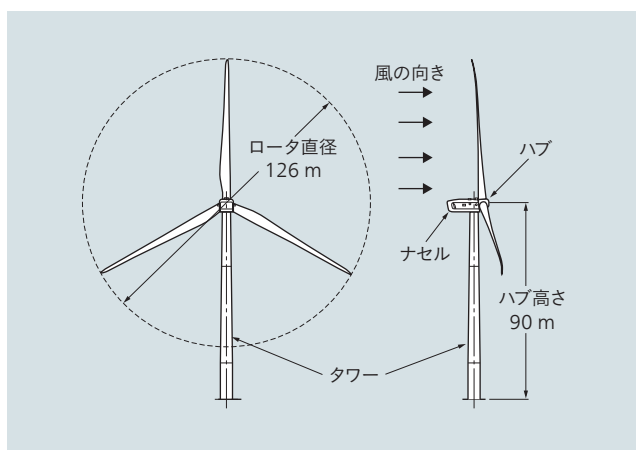


図1 「HTW5.0-126」の概略寸法

定格出力5 MWの大型風力発電システム「HTW5.0-126」の概略寸法を示す。

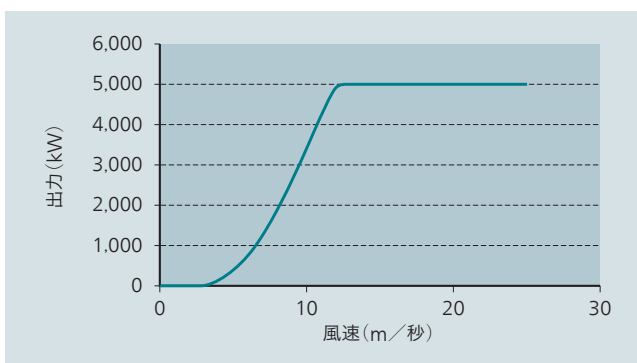


図2 | パワーカーブの設計値

「HTW5.0-126」のパワーカーブ設計値を示す。

表1 | 主要諸元

「HTW5.0-126」の主要諸元を示す。2 MWの「HTW2.0-80」と同様にダウンウィンド型を採用している。

	HTW5.0-126	HTW2.0-80 (参考)
定格出力	5,000 kW	2,000 kW
ロータ位置	ダウンウィンド	同左
ロータ直径	126 m	80 m
ハブ高さ	90 m	65 m/80 m
出力制御方式	ピッチ・可変速	同左
ヨー制御	アクティブヨー	同左
暴風待機	フリーヨー	同左
増速比	約1:40	約1:100 (50 Hz) 約1:120 (60 Hz)
発電機型式	永久磁石同期発電機 (36極)	交流励磁同期発電機 (4極)
カットイン風速	4 m/秒	同左
カットアウト風速	25 m/秒	同左
風速クラス	S (年平均風速10 m/秒)	IIA+

ファーム全体としては風車基礎の合理化による建設コストの低減が見込まれる。

また、風車はヨー制御を行うための風向計を備えているが、アップウィンド型では風向計をロータの風下側に配置するのが一般的なのに対し、ダウンウィンド型風車はロータの風上側に配置できるため、ブレードウェイクによる乱流の影響を軽減し、ヨーエラーによる発電ロスを低減できる（図3参照）。

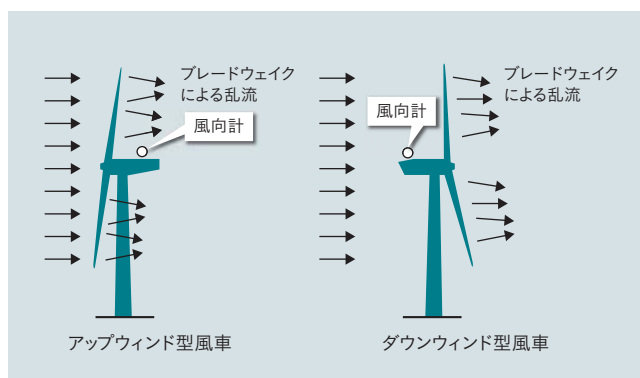


図3 | 風向計の配置とブレードウェイクの関係

ダウンウィンド型風車はロータの風上側に配置できるため、ブレードウェイクによる乱流の影響を軽減できる。

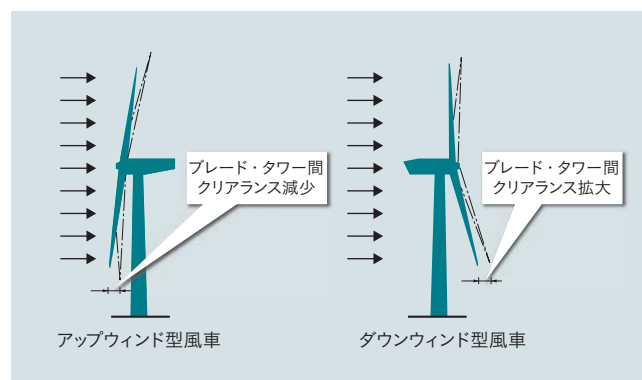


図4 | 強風時のブレード・タワー間クリアランス

ダウンウィンド型では、強風時にはブレードとタワーのクリアランスが拡大し、ブレードとタワーに接触するポテンシャルを軽減できる。

さらに、ダウンウィンド型風車は、ロータが風下側にあるため、強風時には風速が上がるのに従いブレードとタワーのクリアランスが拡大する。これはアップウィンド型が高風速時にブレード・タワー間のクリアランスが減少する方向に向かうのに比べて、ブレードとタワーに接触するポテンシャルを軽減できるため、安全面での強みとなる（図4参照）。

2.2 5 MW大型風車の機器構成

5 MW大型風車のナセル内の機器配置を図5に示す。大型風車においては一般的に風速の変化に応じて周速比(λ)が一定になるように回転速度を変化させる可変速運転が行われる（図6参照）。ブレード形状が同じ場合、周速比は風車サイズによらず一定にすべきとされており、このため同一風速条件下ではロータ径が大きい風車ほど角速度を低くする必要がある³⁾。したがって、発電機入力軸の回転数を同じにするにはロータ径が大きいほど高い増速比が必要となり、増速機の不具合ポテンシャルが増すことになる。この対策として、増速比を約1:40に抑えた増速機と、極数36の永久磁石同期発電機を組み合わせた中速ギアドラ

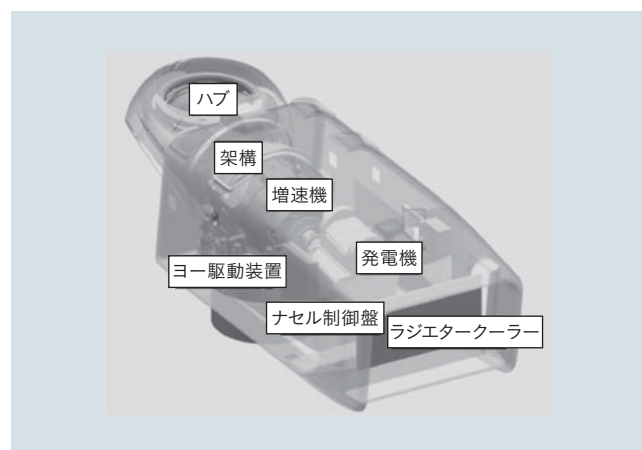


図5 | ナセル内機器配置

5 MW大型風車のナセル内の機器配置を示す。

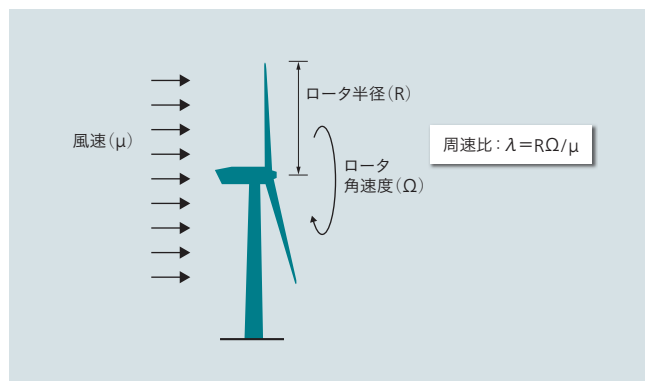


図6 風車の周速比

一般的に風速の変化に応じて周速比 λ が一定になるように可変速運転が行われる。

イブ方式の採用によって不具合ポテンシャルの低減を図っている。

3. 電力流通変電設備

風車から既設電力系統までの電力流通設備を、5 MW大型洋上風力発電システムへ適用した例を図7に示す。風力発電機で発生した電力は、数基の発電機どうしを接続する電力ケーブル(アレイケーブル)と陸上側に向かう電力ケーブル(エクスポートケーブル)を経由し、陸上に設けられた連系変電所に移送される。連系変電所では、変圧器を介して電圧が系統電圧に昇圧され、系統連系点で既存電力系統に接続される。これら流通変電設備のうち、変電設備および海底ケーブルの概要を以下に記す。

3.1 変電設備

超高圧開閉器、電力系統解析、機器保護制御および SVC (Static Var Compensator), HVDC (High Voltage Direct Current) といった変電設備に関しては、長年にわたり多方面での実績を有しており、これらの技術・ノウハウ

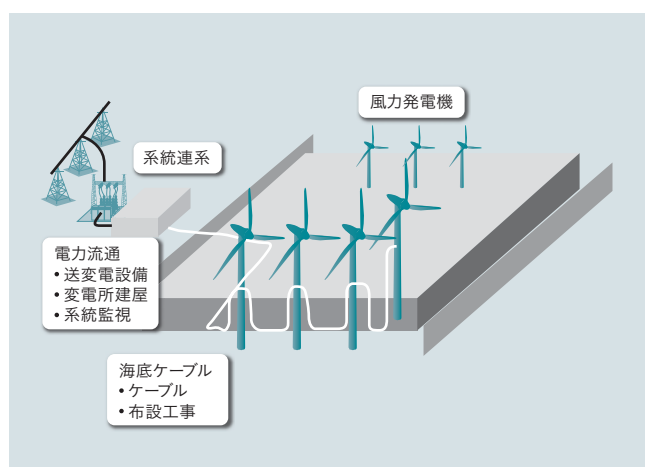


図7 電力流通設備の概要

風力発電機で発生した電力は、アレイケーブルとエクスポートケーブルを経由し、陸上に設けられた連系変電所に移送される。

ウは洋上ウィンドファームの連系変電所にも応用が可能である。系統連系のための変電設備の結線例を図8に示す。風車で発電した電力を2台の変圧器で昇圧し、既存基幹送電線路へ連系する構成である。洋上風力発電機の設備利用率は50%以下と言われており⁴⁾、1台の変圧器が故障した場合においても健全な1台で運転継続可能な冗長性を持たせている。また既存送電線への連系には常用・予備受電方式を採用し、信頼性を高めている。系統連系にあたっては、電圧変動などの系統解析を行うとともに、系統側から風車に至るまでのきめ細かい保護協調を実施する。

受変電機器自体についてもコンパクト化、環境負荷の低減を図っている。一例として、275 kVガス絶縁開閉装置 (GIS : Gas Insulated Switchgear) は三相一括母線の採用により、その設置占有面積、使用する絶縁ガス (SF₆) 量をも低減可能である。また、33 kV遮断器 (パッケージ型 GIS) にはT型ケーブルヘッドが採用されている。T型ケーブルヘッドはあらかじめ設けられた課電用端子 (通常時はプラグで封止されている) に試験用リード線を外部からカップリングすることにより、試験電圧が課電可能な構造となっていることが特徴である。すなわち、外部からの断

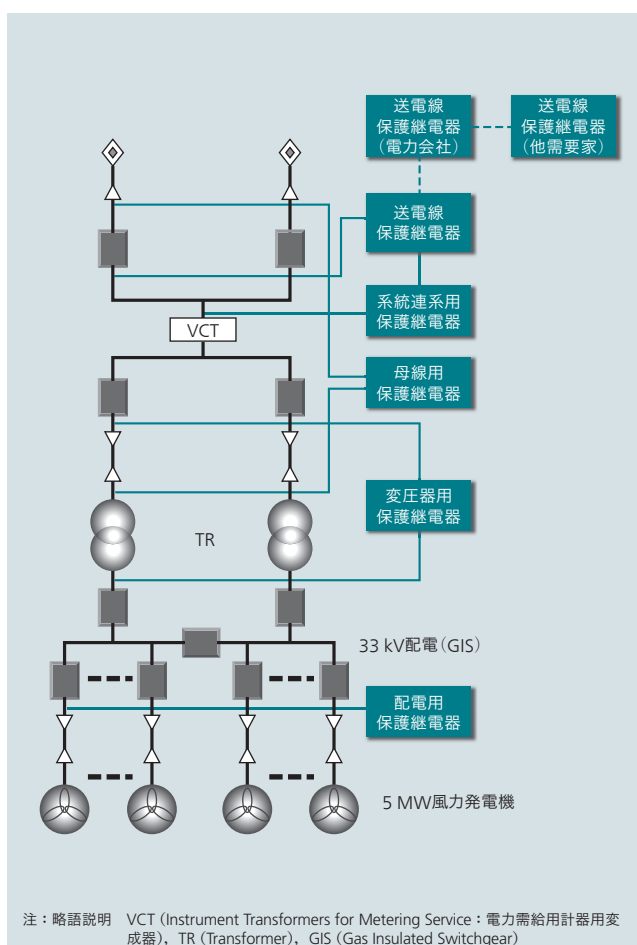


図8 連系変電設備の結線図 (概略)

風車で発電した電力を2台の変圧器で昇圧し、既存基幹送電線路へ連系する構成である。

路器の操作だけで機器の電気試験と電力ケーブルの電気試験が可能で、内部結線を変更する必要がないため、結線切り替え時に起こり得るSF₆ガスの放出を防止できる。

3.2 海底ケーブル

海底ケーブルは延線時の布設船からの懸垂力に耐える必要があること、潮流・漁具などによる外傷を防止するために、6 mm以上の直径を有する一重または二重鉄線鎧(がい)装をケーブル外層に設けた構造を有することが多い。鉄線鎧装の一重・二重の区分は、布設される環境によって左右されるが、通常は一重鉄線鎧装が使用されている。これに対し、潮流が早く水深が深い場合および水底が岩盤・岩石の場合には二重鉄線が採用されることもある^{5), 6)}。

わが国においては、絶縁体には低損失特性を有する架橋ポリエチレン(XLPE)が多く使用されているが、架橋ポリエチレンは水トリを代表とする長期間の耐水性に劣るため、海底ケーブルにおいては遮水を目的として鉛被などの金属層を設ける場合が多い。

前述のような金属層付加による外傷防止策を施しても海底ケーブルの事故発生割合は依然として高く、CIGRE(International Council on Large Electric Systems: 国際大電力システム会議)によれば海底ケーブルの事故頻度は最大で0.7954回/100 km・年でその大部分は漁具やアンカーなどの外的要因(外傷)と報告されている⁷⁾。海底ケーブルの事故復旧には修理用ケーブルの製造・再布設・復帰までが相当長期にわたる可能性があるため、ケーブル事故をウィンドファームの稼働率低下に直結させないための対策が求められる。ケーブル事故対策として、海底ケーブルを海床から0.5 m～1.5 mの深さに埋設して漁具傷害を低減する布設工法や、複数の風力発電機を海底ケーブルでループ状に接続し、事故時に送電経路を切り替える系統設計を積極的に提案している。

風車基礎近傍では潮流によって海底地盤が浸食を受ける洗掘現象が発生し、洗掘深さは基礎直径の2.5倍に及ぶとされている⁸⁾。洗掘により海底ケーブルが懸垂状態になり、最悪の場合破断する恐れもあり、これを避けるため、風車基礎近傍の海底ケーブルに対しても洗掘防止を考慮した布設設計を考慮しておくことが望ましい。

4. おわりに

ここでは、ダウンウィンド型5 MW大型洋上風力発電設備の概要と、流通変電設備について述べた。

今後は、実証機の建設、実証試験による性能確認を経て5 MW機を本格的に洋上ウィンドファームに展開させていく。本稿で述べた技術は、洋上風力の拡大に貢献するとともに、地球環境に配慮した国産エネルギーの開発にも貢献できるものとする。

参考文献など

- 1) 環境省：平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書，表4-8，<http://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/>
- 2) 石原：福島沖浮体式洋上ウィンドファーム実証研究，一般社団法人日本風力発電協会誌，第8号，pp.3～12 (2012)
- 3) ジョン・トワイデル，外：洋上風力発電，鹿島出版会，p.17 (2009)
- 4) 岩本：洋上風力発電 次世代エネルギーの切り札，日刊工業新聞社，pp.33～234 (2012.12)
- 5) 飯塚，外：電力ケーブル技術ケーブルハンドブック―新版，pp.366～368，電気書院 (1989.3)
- 6) 藤井，外：Fukushima FORWARD Projectにおける送電システムの開発，古河電工時報，第131号，pp.44～48 (2013.2)
- 7) CIGRE TB379：Update of service experience oh HV underground and submarine cable systems，Table 30 (2009)
- 8) ジョン・トワイデル，外：洋上風力発電，鹿島出版会，pp.252～253 (2009)

執筆者紹介



井上 信三

1995年 日立製作所入社，電力システム社 電機システム事業部 発電機システム本部 風力推進部 所属
現在，風力発電システムの取りまとめに従事



石橋 達司

2013年 日立製作所入社，電力システム社 電機システム事業部 発電機システム本部 風力推進部 所属
現在，風力発電システムの取りまとめに従事
電気学会会員



松信 隆

1983年 日立製作所入社，電力システム社 電機システム事業部 発電機システム本部 風力推進部 所属
現在，風力発電システムの取りまとめに従事